Технические науки

УДК 004.73

Колесников Константин Васильевич
кандидат технических наук, доцент
Черкасский государстенный технологический университет
Карапетян Анаит Радиковна
старший преподаватель
Черкасский государстенный технологический университет,Украина
Курков Андрей Сергеевич
Магистрант
Черкасский государстенный технологический университет
Kolesnikov K.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate professor
Cherkasy State Technological University,
Karapetyan A.R.
Senior Lecturer
Cherkasy State Technological University
Kurkov A.S.
Master of Science
Cherkasy State Technological University

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ ДАННЫХ В ДИНАМИЧЕСКИХ СЕТЯХ
NEURAL NETWORK MODELSOF DATA DELIVERY ROUTE OPTIMIZATION IN DYNAMIC NETWORKS

Аннотация: Проведен анализ существующих методов решения задачи сетевой маршрутизации с использованием нейросетевых технологий, а именно, сетей Хопфилда. Актуальности исследованию придаёт предложение функции Ляпунова для решения задачи маршрутизации с учетом пропускной способности и количества каналов связи, задействованных в маршруте.

Ключевые слова: маршрутизация, нейронные сети, сети Хопфилда, адаптивная маршрутизация, функция энергии.

Summary: The analysis of the existing methods of solving the task of network routing by applyingthe neural network technologies, namely Hopfield net, was

performed. The research is relevant due to the suggestion of Lyapunov function to solve the task of routing taking into account the network capacity and the number of data links involved into the route.
Keywords: routing, neural networks, Hopfield networks, adaptive routing, a function of energy.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с повышением качества обслуживания (QoS, Quality of Service) телекоммуникационных систем (ТКС) со стороны провайдеров и операторов, а также ростом требований к скорости передачи и качеству сигнала у потребителей, задача повышения эффективности использования сетевых ресурсов становится все более актуальной. Одной из ключевых задач на сегодня является маршрутизация данных. В ТКС искусственные нейросети применяются для управления коммутацией при адаптивной маршрутизации, для управления трафиком и оптимального распределения загрузки сетевых каналов.

С использованием нейросетевых технологий успешно реализуется работа высокоскоростной коммутационной сети с пакетной асинхронной передачей, а также существует возможность построения коммутаторов с нейросетевым управлением на несколько тысяч каналов.

Задачи выбора маршрута, а также планирования работы сетевых устройств, относят к классу комбинаторно-оптимизационных задач, для которых нельзя найти простые аналитические решения. Кроме того, сложность вычислений при увеличении количества узлов сети возрастает экспоненциально. Достичь уровня адекватности математического описания ТКС возможно лишь в рамках моделей, учитывающих особенности динамического функционирования системы. В данной работе предлагается использовать модели, построенные на базе нейронной сети Хопфилда (НСХ), которые позволят при значительном снижении

временных затрат получить хорошие, близкие к оптимальным, решения. На этих моделях базируется большинство разработок данной предметной области.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается подход к решению оптимизационных задач на примере решения классической задачи коммивояжера. Проблема формулируется следующим образом: есть некоторая группа городов, известны расстояния между ними, необходимо найти кратчайший маршрут разового посещения каждого города с возвратом в стартовую точку.

Города, которые необходимо посетить, обозначим A, B, C..., расстояния между ними –$d_{AB,}$ $d_{AC,}$…, d_{BC} … Упорядоченное множество из *n* городов будет решением. Последовательность посещения городов обозначим матрицей *n* x *n*, строки будут соответствовать городам последовательности, а столбцы – номерам городов. Например, имеется пять городов A, B, C, D, E, а последовательность обхода этих городов задана матрицей (1).

	1	2	3	4	5
A	0	1	0	0	0
B	0	0	0	1	0
C	1	0	0	0	0
D	0	0	0	0	1
E	0	0	1	0	0

(1)

Из матрицы видно, что город C посещается первым, A –вторым, город E – третим и т. д.

РЕШЕНИЕ

Длина маршрута $d_{CA}+d_{AE}+…+d_{DC}$. Поскольку каждый город посещается только один раз, то в каждом столбце и в каждой строке может быть только одна единица. Матрица представляет собой состояния нейронной сети, которая содержит $N=n^2$ нейронов. Из n!/2n маршрутов выбирается один с наименьшей длиной [1]. В этом состоит суть задачи.

Каждый нейрон имеет два индекса, которые описывают его состояние (город и порядковый номер в маршруте).

Для решения данной задачи составляется функция энергии для нейронной сети (НС), предназначенной для решения задачи коммивояжера. Пусть состояние с наименьшей энергией соответствует самому короткому маршруту. В общем виде, такая функция для рассматриваемой НС может иметь вид [2]:

$$E = -\frac{1}{2}\sum_i \sum_j w_{ij} Y_i Y_j - \sum_j I_j Y_j - \sum_j T_j Y_j \qquad (2)$$

где: E – искусственная энергия сети; w_{ij} – вес от входа нейрона i к входу нейрона j; Y_j – выход нейрона j; I_j – внешний вход нейрона j; T_j – порог нейрона j.

Изменение состояния j-нейрона вызывает изменение энергии, которое можно вычислить по формуле:

$$\delta E = \left(\sum \left(w_{ij} Y_i \right) + I_j - T_j \right) \delta Y_j \qquad (3)$$

где δY_j – изменение выхода j-го нейрона.

Энергия устойчивого состояние меньше, чем неустойчивого. Из множества состояний необходимо найти такое, при котором достигается минимальное значение энергии[3]. Функция энергии должна поддерживать устойчивые состояния в матрице (1) и те решения, которые отвечают коротким маршрутам. Этим требованиям удовлетворяет функция энергии(при этом, Y_{xj}= 0,1):

$$E = \frac{A}{2}\sum_x \sum_i \sum_{j \neq 1} Y_{xi} Y_{xj} + \frac{B}{2}\sum_i \sum_x \sum_{k \neq 1} Y_{xi} Y_{ki} + \frac{C}{2}\left(\sum_x \sum_i Y_{xi} - n \right)^2 + \frac{D}{2}\sum_x \sum_{k \neq x} \sum_i d_{xk} Y_{xi} \left(Y_{k,i+1} + Y_{k,i-1} \right) \qquad (4)$$

Первые три члена выражения (4) поддерживают первое требование, четвертый член – второе; A, B, C, D – положительные множители. Первый член равен нулю, если каждая строка x содержит не больше одной единицы. Второй равен нулю, если каждый столбец содержит не более

одной единицы. Третий равен нулю, если в матрице (1) *n* единиц. Таким образом, без учета четвертого члена функция энергии имеет минимумы во всех состояниях, представленных матрицей (1). Все другие состояния имеют большее значение энергии. Короткие маршруты поддерживает четвертый член. Индексы *i* в нем берутся по *mod n*, для того чтобы показать, что *i*-й город соседствует в маршруте с (n–1)-м и первым, т. е. $Y_{k,n+j} = Y_{kj}$. Четвертый член равен длине маршрута.

Если раскрыть скобки и приравнять коэффициенты квадратичных и линейных членов, получим матрицу связей и внешние взаимодействия:

$$w_{xi,kj} = -A\delta_{xk}(1-\delta_{ij}) - B\delta_{ij}(1-\delta_{xk}) - C - Dd_{xk}(\delta_{j,i+1}+\delta_{j,i-1}) \qquad (5)$$

где, $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$, в противном случае $\delta_{ij} = 0$. Кроме того, каждый нейрон имеет смешанный вес $I_{xi} = Cn$.

Первый член в (5) задает связи нейронов в каждой строке, второй – внутри каждого столбца, третий и четвертый задают глобальные связи. И в (4), и в (5), три первых члена отвечают за общие ограничения для любой задачи коммивояжера и приводят НС в устойчивое состояние. Четвертый член управляет тем, какое из *n!/2n* возможных различных финальных состояний соответствует самому короткому маршруту.

При совместном решении задачи поиска маршрутов важна взаимосвязь между маршрутизацией и планированием последовательности выбора направления для передачи по используемым каналам связи. Правильный выбор маршрута позволяет спланировать работу так, чтобы минимизировать время ее выполнения. В этом случае степень узла определяется как сумма всех поступающих и исходящих потоков.

Показатель качества работы необходимо согласовывать со структурой НСХ. По аналогии с моделью,рассмотренной выше, показатель «энергии перегрузки» задается формулой:

$$E_b = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_{SD}}\sum_{k=1,k\neq i}^{N_{SD}}\sum_{j=1}^{N_p(i)}\sum_{k=1}^{N_p(k)}\left|P_{ij}\cap P_{kl}\right|V_{ij}V_{kl} \qquad (6)$$

где: P_{ij} – j-ый маршрут между i-ой парой источник – приемник; $\left|P_{ij} \cap P_{kl}\right|$ - число узлов, которые совместно используют маршруты P_{ij} и P_{kl} ; V – выходное напряжение нейронов; *Np(i)* – число вариантов маршрутов, определенных между i-ой парой источник–приемник.

$$V_{ij} = \begin{cases} 1, \textit{если выбирается } P_{ij} \\ 0, \textit{если не выбирается } P_{ij} \end{cases}$$

Необходимо как можно лучше минимизировать значение E_b с учетом того, что для каждой пары SD выбирается только один маршрут (т.е., V_{ij} =1 для единственного значения j для каждого значения i). В этом случае энергия перегрузки соответствует сумме числа общих узлов всех выбранных маршрутов (по одной для каждой SD пары), взятых попарно.

Рассмотрим модель НСХ, используемую в этом случае для выбора маршрута между несколькими SD парами в сети. Выходные напряжения нейронов такой НС приближаются к двоичным значениям по мере перехода сети к состоянию устойчивого равновесия с минимальной "энергией". Соединения между нейронами i и j описываются весом T_{ij},, который положителен при возбуждающем соединении и отрицателен при запрещающем. В рассматриваемой модели НС между каждой парой SD определяется один нейрон.

Происходит эволюция НС от некоторого начального состояния до состояния равновесия, что отображает минимум функции энергии Ляпунова. По аналогии ее можно записать через веса соединений, токи смещений и напряжения выходов нейрона.

$$E_{total} = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_{ИП}}\sum_{k=1}^{N_{ИП}}\sum_{j=1}^{N_p(l)}\sum_{i=1}^{N_p(l)} T_{ij,kl}V_{ij}V_{kl} - \sum_{i=1}^{N_{ИП}}\sum_{j=1}^{N_p(l)} V_{ij}I_{ij} \qquad (7)$$

В выражении (7), целевая функция, моделируемая с помощью НСХ, включает взвешенные суммы произведений пар выходных напряжений нейронов и выходных напряжений, взятых по отдельности. $T_{ij,kl}$– вес

соединения между нейронами *ij* и *kl*,I_{ij} – ток смещения, прикладываемый к нейрону *ij*, *Np(i)* – число маршрутов SD. В рассматриваемой модели веса соединений являются симметричными, (т.е. *Tij,kl = Tkl,ij*). Эта симметрия гарантирует сходимость к устойчивому состоянию [4]. Общее число нейронов N задается как $N = \sum_{i=1}^{N_{SD}} N_p(i)$. Следовательно, веса соединений *Tij,kl* являются элементами матрицы размерности N*N.

Задачу оптимизации с ограничениями можна свести к задаче без ограничений, посредством использования множителей Лангранжа. Тогда, функция энергии перегрузки может быть определенакак:

$$E_{total} = bE_b + \sum_{c=1}^{3} \lambda_c E_c - I \sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_{p(i)-}} V_{ij} \tag{8}$$

Ограничениями для задачи выступают соответствующие члены уравнения энергии перегрузки *Ec* (равны нулю, если ограничение выполняется) и формулируются так:

1) на SD пару активизируется не более одного маршрута;
2) в сети выбираются строго N_{SD} маршрутов;
3) на SD пару выбирается строго один маршрут.

Подстановка выражений для E_bи *Ec* в (8) дает:

$$E_b = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{k=1,k\neq i}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_p(i)} \sum_{k=1}^{N_p(k)} \left| P_{ij} \cap P_{kl} \right| V_{ij} V_{kl} + \frac{\lambda_1}{2} \sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_p(i)} \sum_{i=1,i\neq j}^{N_p(i)} V_{ij} V_{il} + \frac{\lambda_2}{2} \left(\sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_p(i)} V_{ij} - N_{SD} \right)^2 +$$
$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{SD}} \left(\sum_{i=1}^{N_p(i)} V_{ij} - 1 \right)^2 + \frac{\lambda_3}{2} \sum_{i=1}^{N_{SD}} \left(\sum_{i=1}^{N_p(i)} V_{ij} - 1 \right)^2 - 1 \sum_{i=1}^{N_{SD}} \sum_{j=1}^{N_p(i)} V_{ij}. \tag{9}$$

Важным вопросом разработки модели НСХ, а также последующего моделирования работы системы является выбор коэффициентов λ_c. Фактически, любые значения λ_c приведут к получению справедливых выражений для E_{total}. Но, в случае, если система будет эволюционировать, можно гарантировать только локальный минимум, при котором конечное состояние зависит от начального, с которого началась эволюция. В

большинстве исследований, посвященных использованию НСХ, величины коэффициентов считаются постоянными, лучшие значения которых обычно определяются в ходе испытаний при программном моделировании. Оценить качество решения задачи обычно не представляется возможным, так как число возможных решений для больших сетей очень велико.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены нейросетевые модели оптимизации маршрутов доставки данных в динамических сетях, предложен метод использования НС для поиска оптимального маршрута в сетях с адаптивной маршрутизацией. Представлен результат проведенного исследования по разработке функции Ляпунова для НСХ, которая обеспечивает быструю сходимость НС к требуемым решениям, а также позволяет уменьшить количество ребер в вырабатываемом маршруте.

Сформированные подходы позволяют значительно упростить решение задачи маршрутизации в сложных компьютерных ТКС.

Возможными направлениями дальнейших исследований могут быть поиск методов конструирования функций Ляпунова для задач маршрутизации с заданными свойствами. Также перспективным является внедрение нейросетевых методов решения таких задач, как балансировка буферных и канальных ресурсов, решение задачи многопутевой маршрутизации, а также задач маршрутизации со многими метрикамикак линейными, так и нелинейными.

Литература:

1. Павленко М.А. Анализ возможностей искусственных нейронных сетей для решения задач однопутевой маршрутизации в ТКС *Электронный ресурс* // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 118 – 127.
2. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2003.

3. Колесников К.В., Никулин О.Г., Карапетян А.Р. Использование нейросетевых моделей для определения оптимального маршрута в сетях с адаптивной маршрутизацией пакетов данных // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».Збірник наук. праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.Х.:НТУ «ХПІ» – 2013. – №56 (1029). – С. 50-55.
4. Wieselthier J.E., Barnhart C.M., Ephermides A., A Neyral Networks Approach to Routing Without Interference in Multihop Networks IEEE Transactions on Comm., 1994, vol. 42, no.1, p. 166-177.

References:

1. Pavlenko M.A. Analiz vozmozhnostej iskusstvennyx nejronnyx setej dlya resheniya zadach odnoputevoj marshrutizacii v TKS *Elektronnyj resurs* // Problemy telekommunikacii. – 2011. – # 2 (4). – S. 118 – 127.
2. Komashynskij V.I., Smirnov D.A. Neironnye seti i ih primeneni v sistemax upravleniya i svyazi. M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2003.
3. Kolesnikov K.V., Nikulin O.G., Karapetyan A.R. Ispol’zovanie nejrosetevyh modelej dlya opredeleniya optimal’nogo marshruta v setyax s adaptivnoj marshrutizaciej paketov dannyx // Visnyk Nacional’nogo texnichnogo universitetu «XPI». Zbirny’k nauk. pracz. Seriya: Novi rishennya v suchasnyx texnologiyax. X. :NTU «XPI» – 2013. – #56 (1029). – S. 50-55.
4. Wieselthier J.E., Barnhart C.M., Ephermides A., A Neyral Networks Approach to Routing Without Interference in Multihop Networks IEEE Transactions on Comm., 1994, vol. 42, no.1, p. 166-177.